

Eine Übersicht zur experimentellen Charakterisierung von Kunststoffen für die Crashsimulation

Dynamore Infotag “Simulation von Kunststoffen mit LS-DYNA”, Stuttgart 2012

Stefan Kolling¹, Sebastian Mönlich²

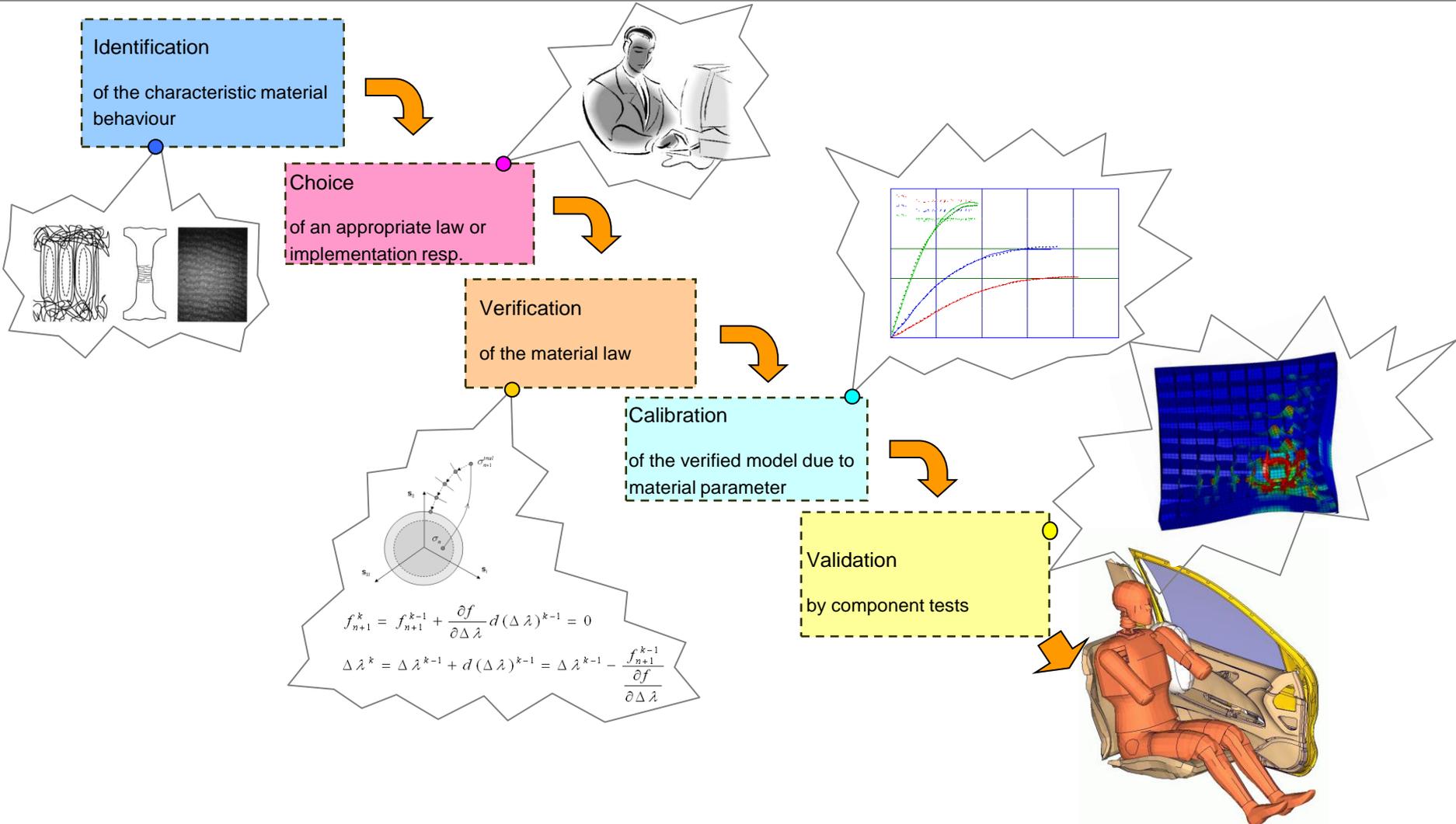
¹ Institut für Mechanik und Materialforschung, TH Mittelhessen, Gießen

² Fraunhofer LBF, Bereich Kunststoffe, Darmstadt

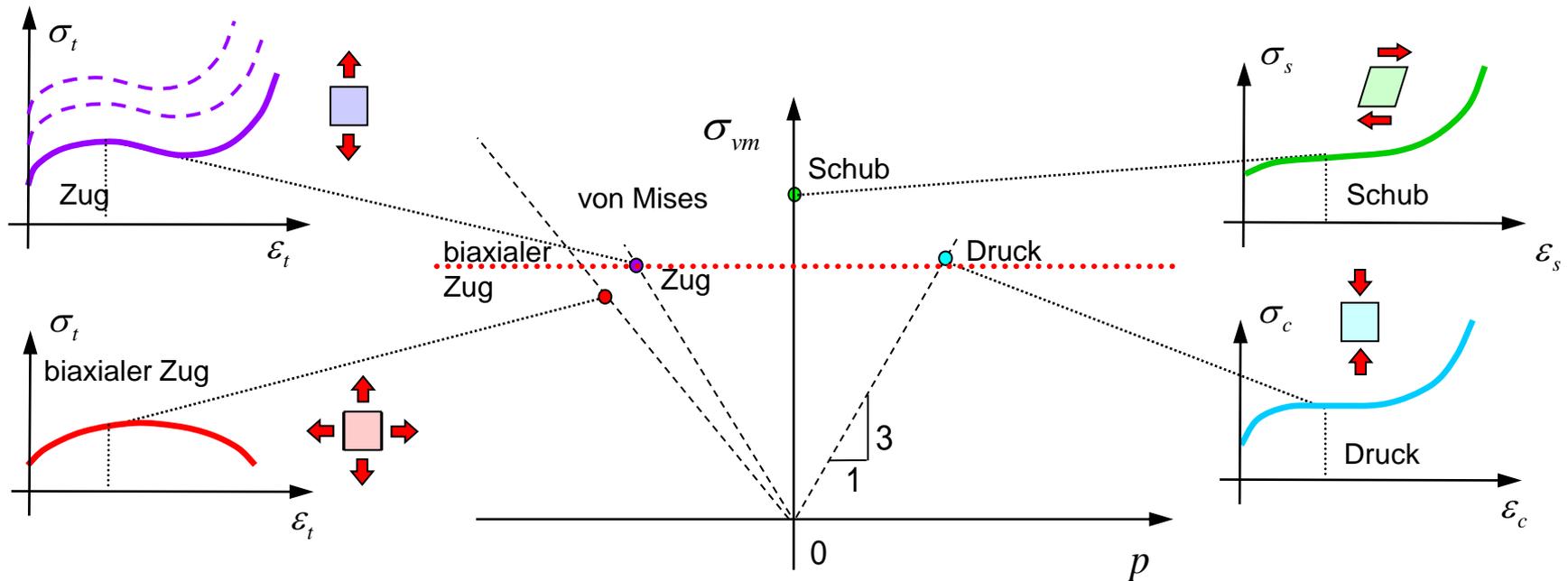
- Was zu tun ist: Validierung / Verifizierung
- Methoden zur dynamischen Charakterisierung
 - Fallturm oder Schnellzerreißer?
 - Optische Verzerrungsmessung (2D oder 3D?)
 - Tests unter mehrachsiger Beanspruchung
 - 4a Impetus – die schnelle Methode zur Materialkarte
- Was tun bei Anisotropie?
- Zusammenfassung

- Was zu tun ist: Validierung / Verifizierung
- Methoden zur dynamischen Charakterisierung
 - Fallturm oder Schnellzerreißer?
 - Optische Verzerrungsmessung (2D oder 3D?)
 - Tests unter mehrachsiger Beanspruchung
 - 4a Impetus – die schnelle Methode zur Materialkarte
- Was tun bei Anisotropie?
- Zusammenfassung

Validierung und Verifizierung



- Kunststoffe: Eine Herausforderung an die Versuchstechnik

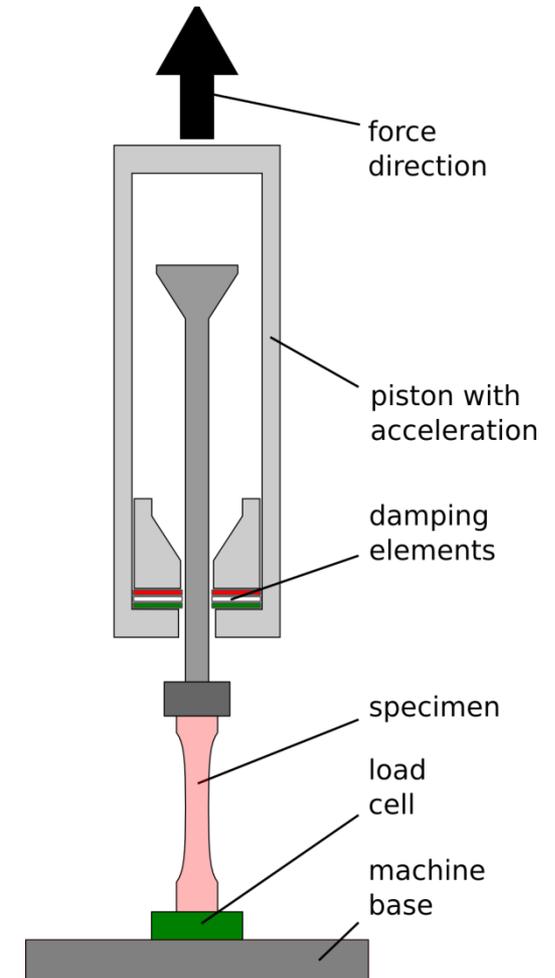


- Was zu tun ist: Validierung / Verifizierung
- Methoden zur dynamischen Charakterisierung
 - Fallturm oder Schnellzerreißer?
 - Optische Verzerrungsmessung (2D oder 3D?)
 - Tests unter mehrachsiger Beanspruchung
 - 4a Impetus – die schnelle Methode zur Materialkarte
- Was tun bei Anisotropie?
- Zusammenfassung

Prüfmaschinen für dynamische Tests

- Servohydraulische Hochgeschwindigkeits-Prüfmaschine
Zwick HTM5020

- $F_{\max} = 50 \text{ kN}$,
 $v_{\max} = 20 \text{ m/s}$,
 $l_{\max} = 50 \text{ mm}$.



Prüfmaschinen für dynamische Tests



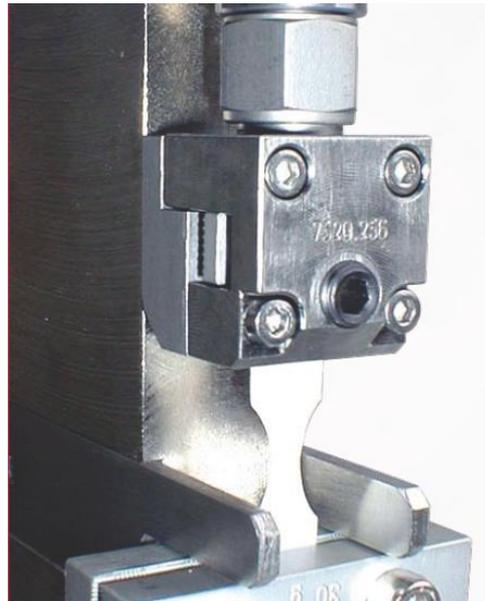
Fallturm Instron CEAST 9350

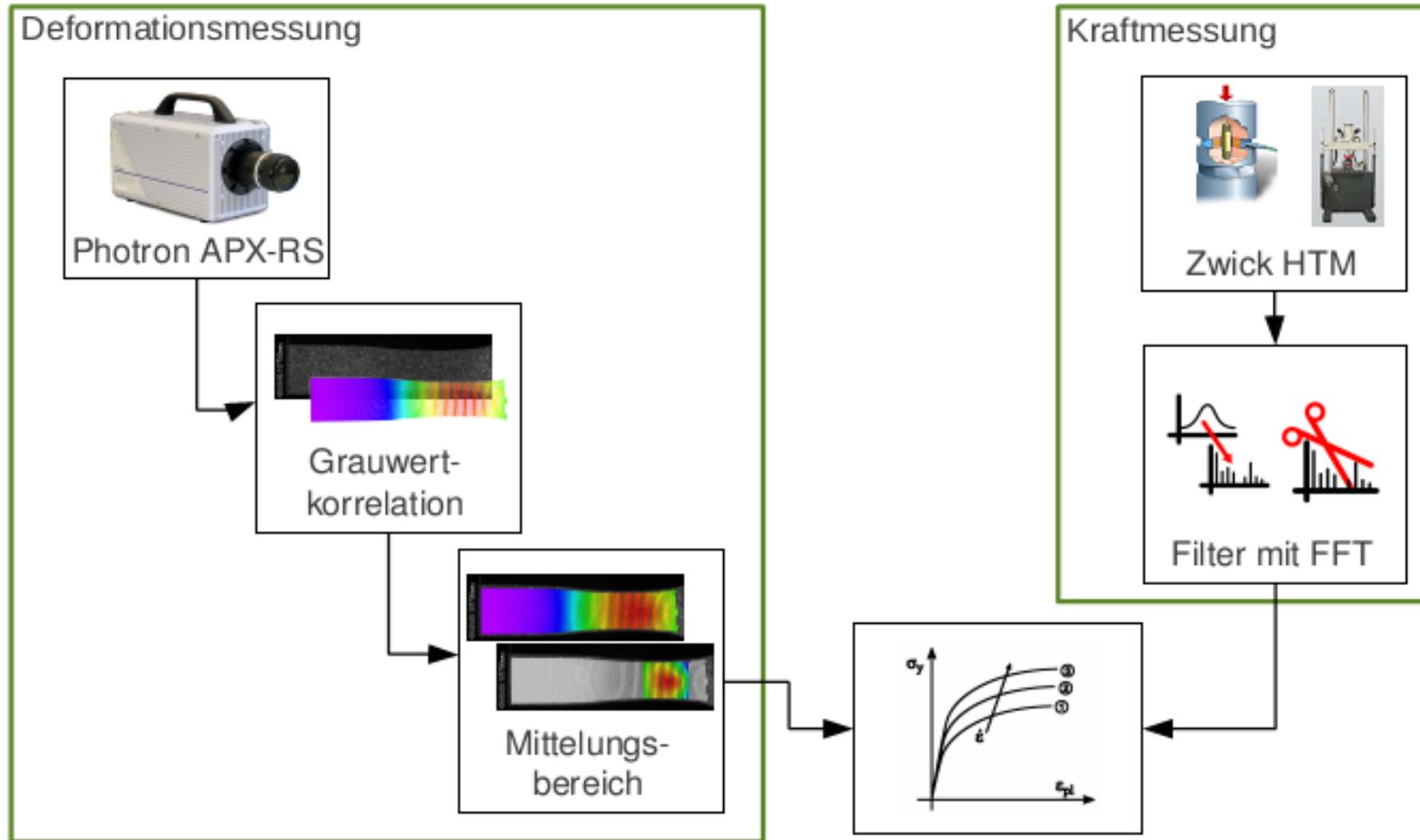
$m = 5.5 \text{ kg} - 70 \text{ kg}$

$v = 1 \text{ m/s} - 24 \text{ m/s}$

Temperierkammer

-70°C bis $+150^\circ\text{C}$





- Wahre Spannung bei Zug in y-Richtung und vorausgesetzter gleicher Poissonzahl in Breiten- (ϵ_{xx}) und Dickenrichtung (ϵ_{zz}):

$$\sigma_W = \frac{F}{A_0 \cdot (e^{2 \cdot \epsilon_{xx}})}$$

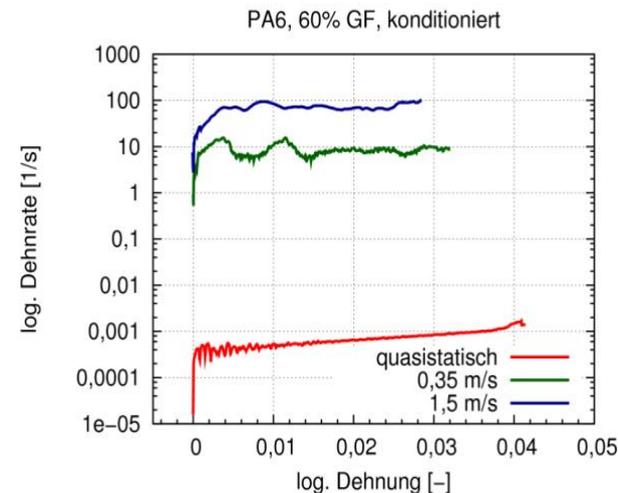
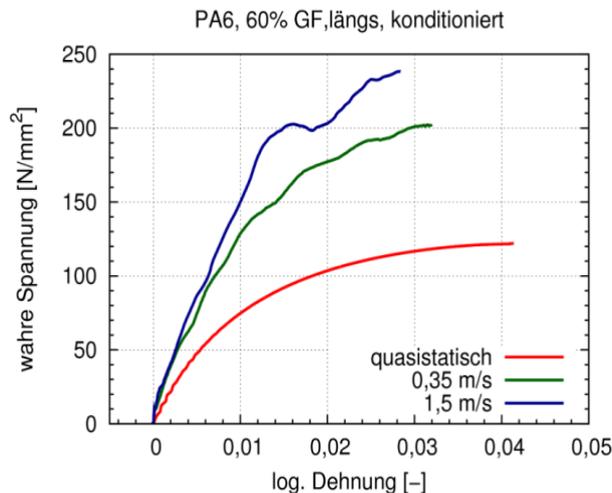
- Volumenkonstante Spannung ($\nu = 0,5$):

$$\sigma_{isochor} = \frac{F}{A_0 \cdot (e^{-2 \cdot \nu \cdot \epsilon_{xx}})}$$

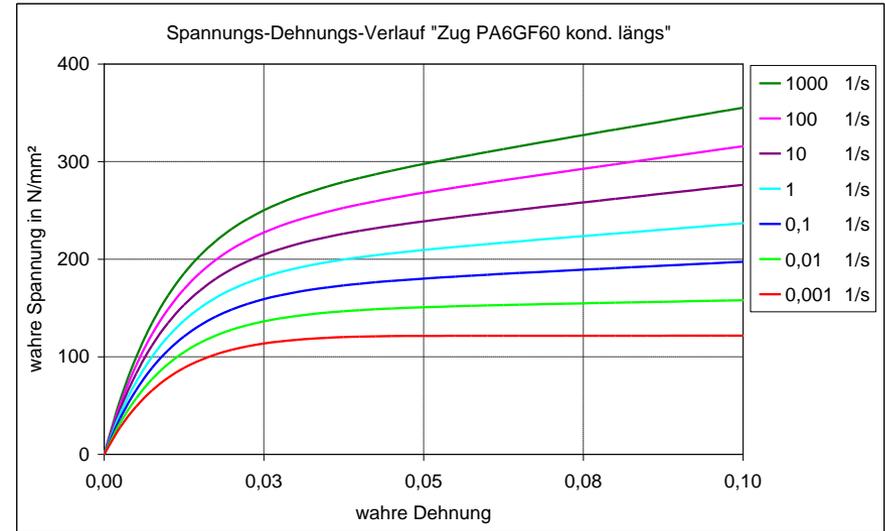
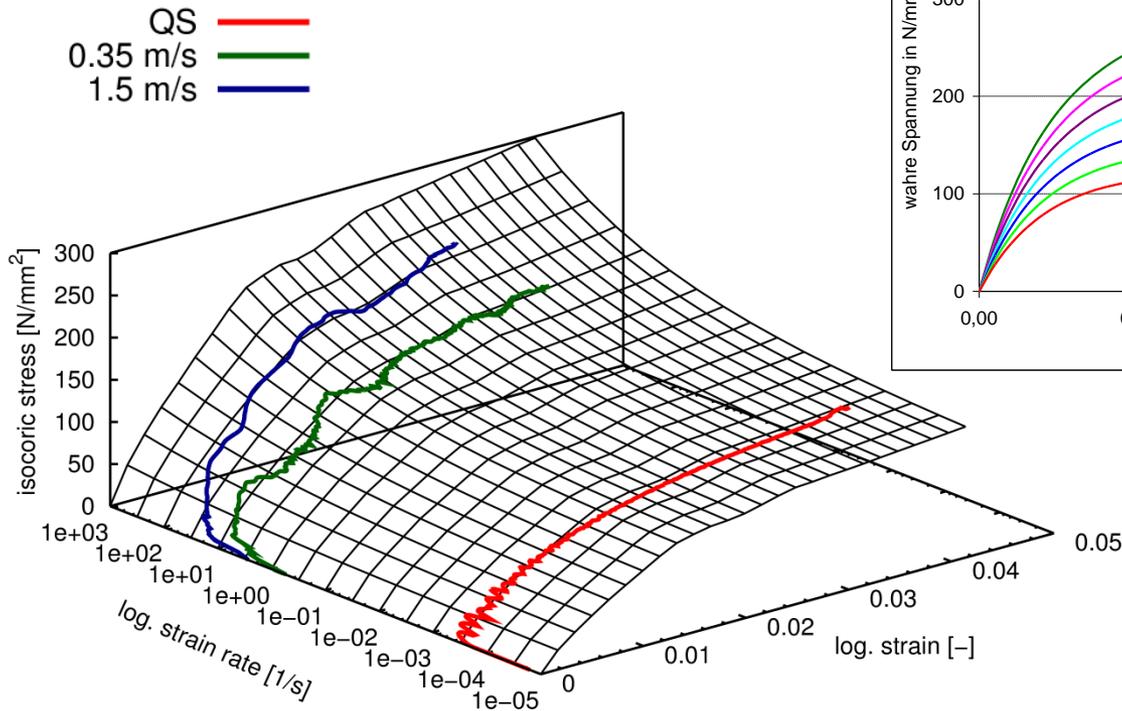
- Technische Spannung:

$$\sigma_{tech} = \frac{F}{A_0}$$

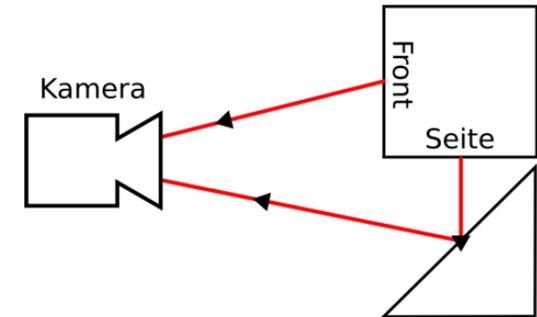
- Geschwindigkeit der Prüfmaschinen bei hohen Geschwindigkeiten nicht regelbar.
- Aufgrund plastischer Deformation mit Lokalisierung muss für konstante Dehnraten die Prüfgeschwindigkeit ansteigen.
- Fazit: Dehnratenkonstante Spannungs-Dehnungskurven müssen über einem Modellansatz berechnet werden.



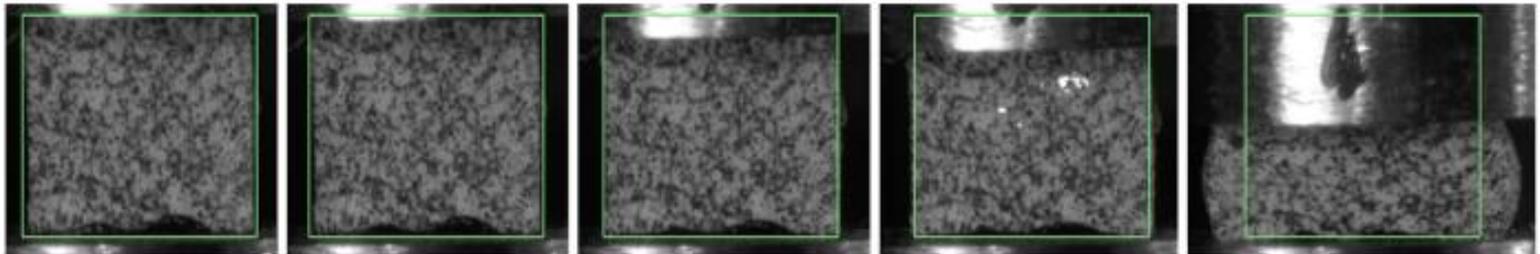
➤ Johnson-Cook Ansatz



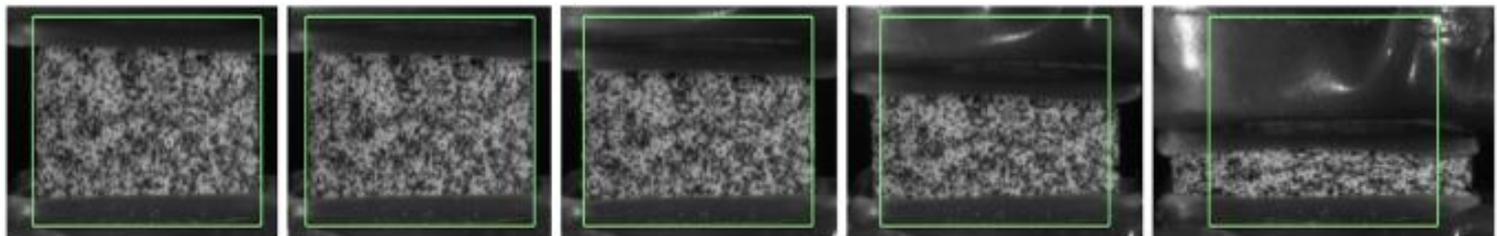
- Getrennte Auswertung von Front und Seite.
- Abbildungsfehler werden korrigiert.
- Reibungseinflüsse:



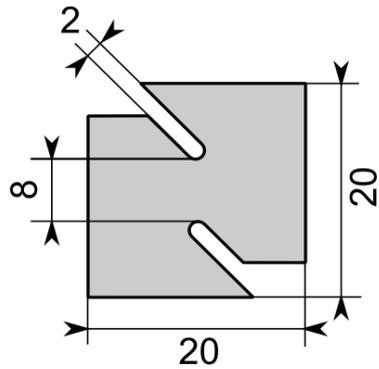
- Reibung



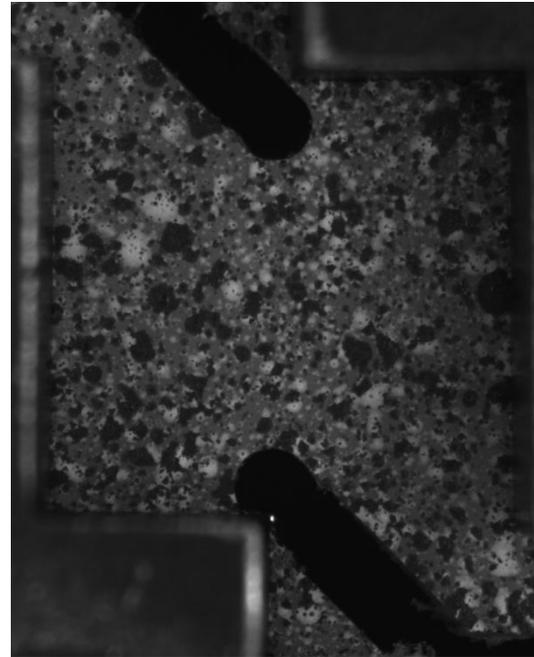
- Reibung minimiert



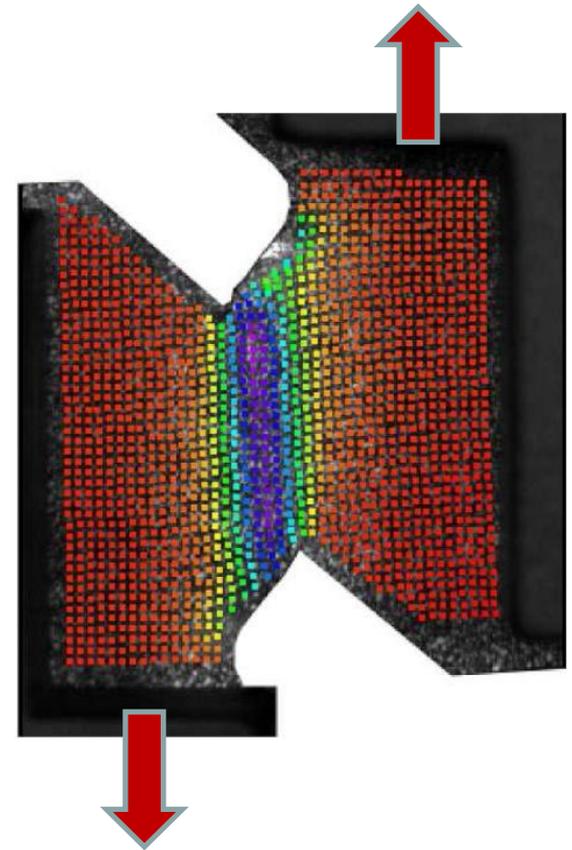
Geometrie



unverformt



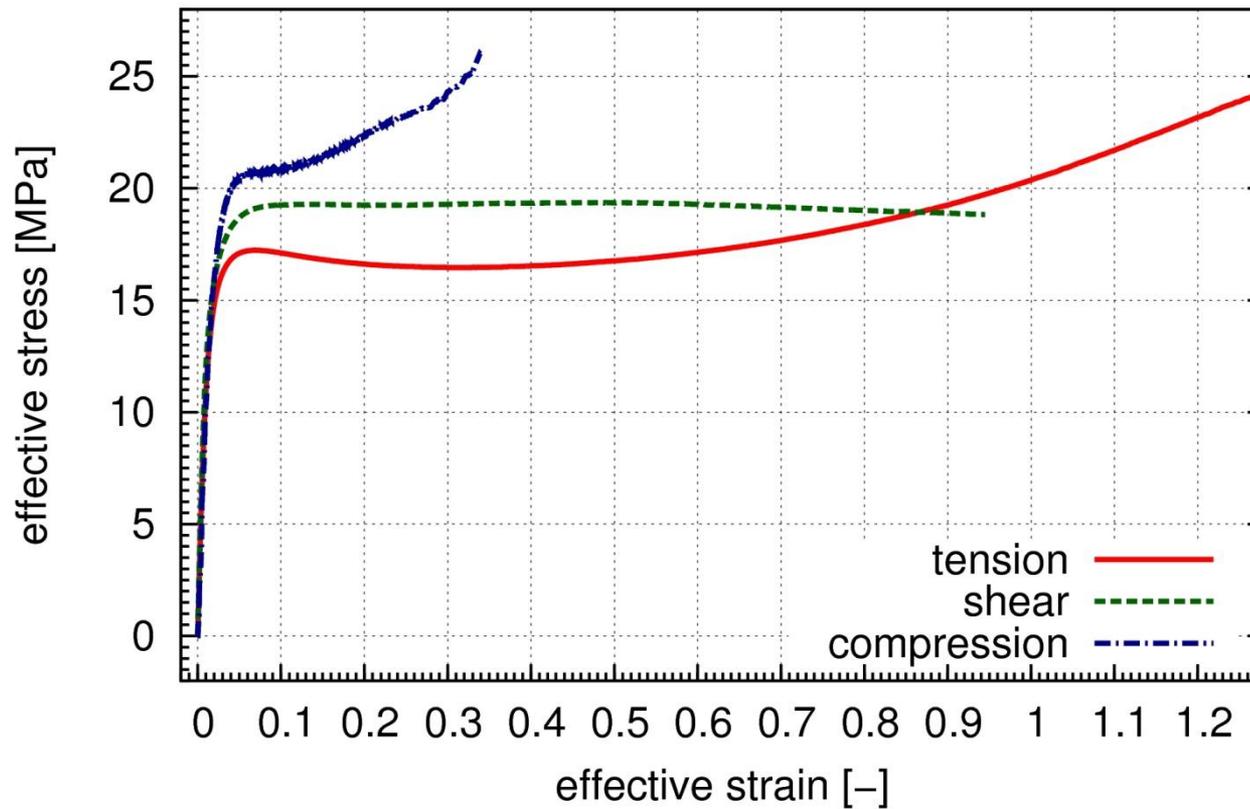
verformt



Vergleichsspannung vs. Vergleichsdehnung



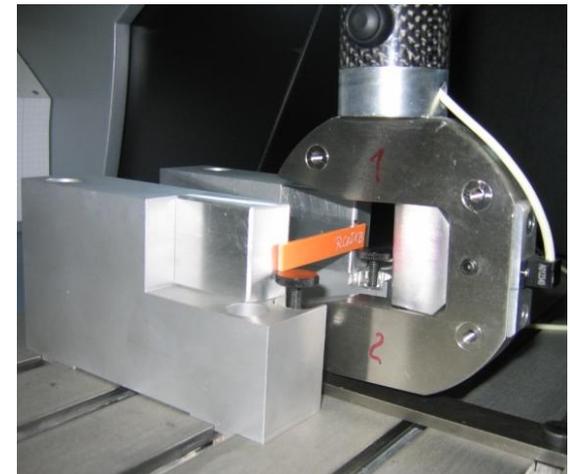
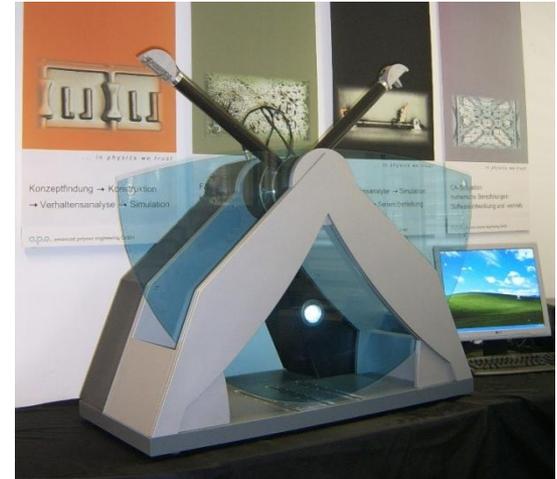
Hostacom XBR169G, longitudinal



4a Impetus – die schnelle Methode zur Materialkarte



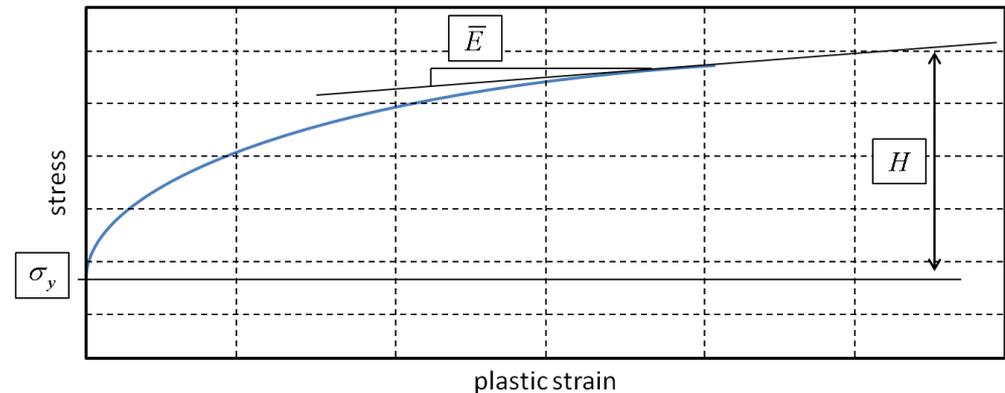
- Pendel – Schlagwerk mit Einfachpendel
- Dehnratenvariation durch
 - Pendelgeschwindigkeit
 - Auflagerabstand
- Geschwindigkeitsbereich: 0.7 – 4.5m/s
- Energieeintrag durch Zusatzmassen
- 5/50/200/400g Beschleunigungssensoren
- Messung von
 - Winkel über Winkelsensor
 - Beschleunigung am Pendelkopf
 - Beschleunigung am Widerlager



- 6-Parameter-Ansatz zur Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung, modifizierter Schmachtenberg + Johnson-Cook

$$\sigma(\varepsilon_p) = \sigma_y + E\varepsilon_p \frac{1 - \frac{\bar{E}}{E}\varepsilon_p}{1 + \frac{E}{H}\varepsilon_p}$$

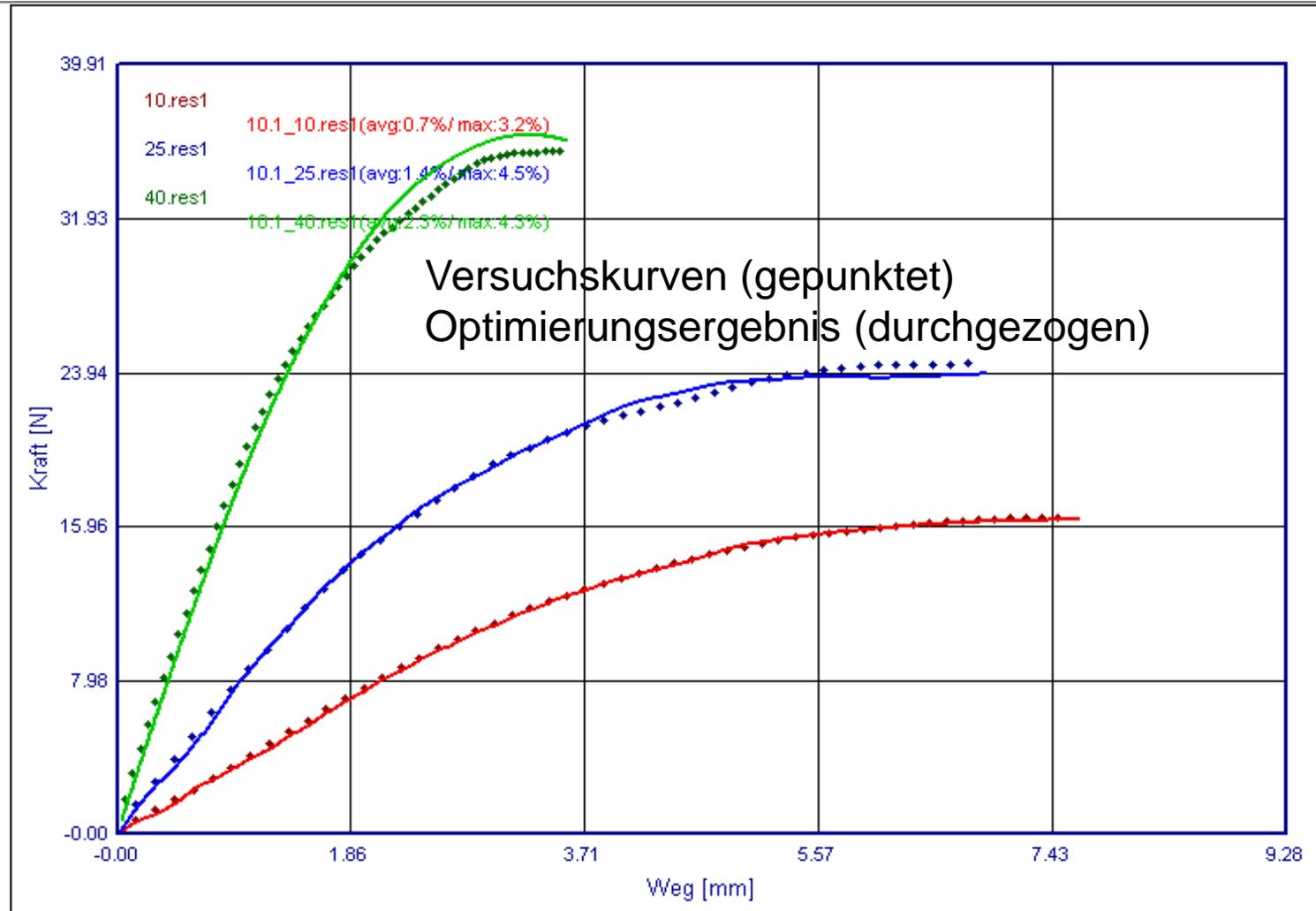
$$\sigma(\dot{\varepsilon}) = \sigma_0 \left[1 + c \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{p0}} \right) \right]$$



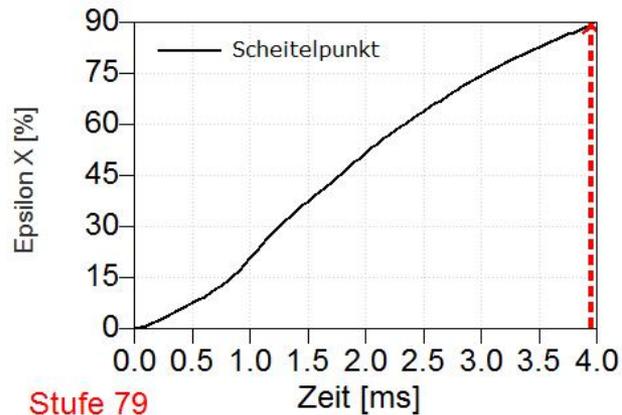
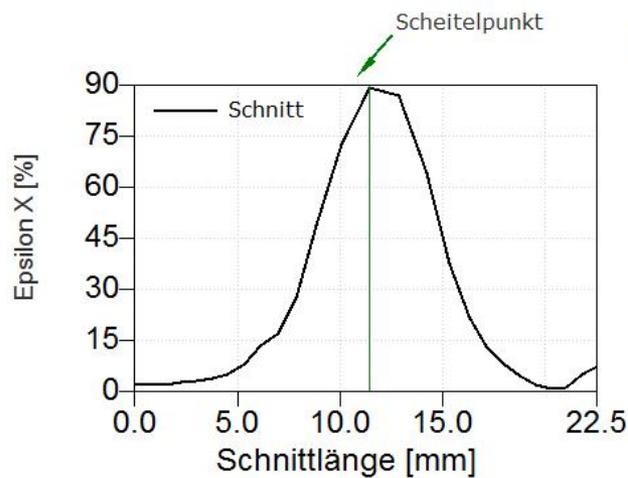
$$\sigma(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p) = \left[\sigma_y + \frac{E\varepsilon_p - \bar{E}\varepsilon_p^2}{1 + \frac{E}{H}\varepsilon_p} \right] \left[1 + \frac{1}{p} \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{p0}} \right) \right]$$

6 Parameter

Optimierung via LS-OPT (Hostacom)

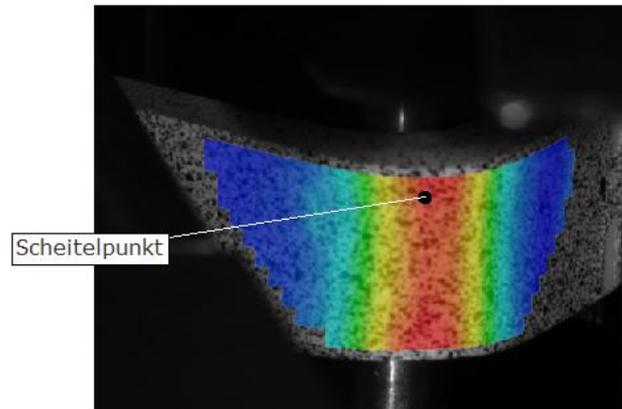
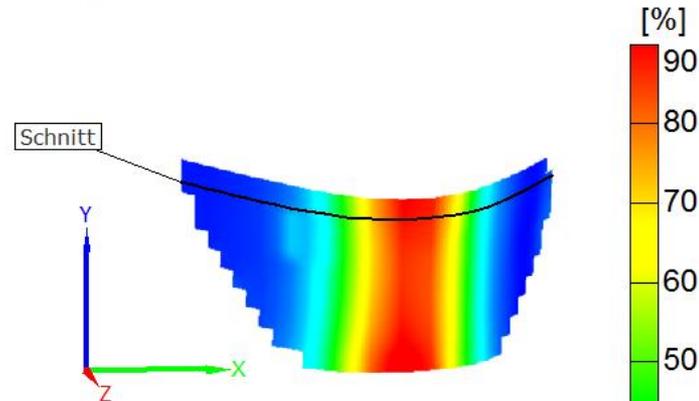


Weitere Verifizierungsmöglichkeit (3D)

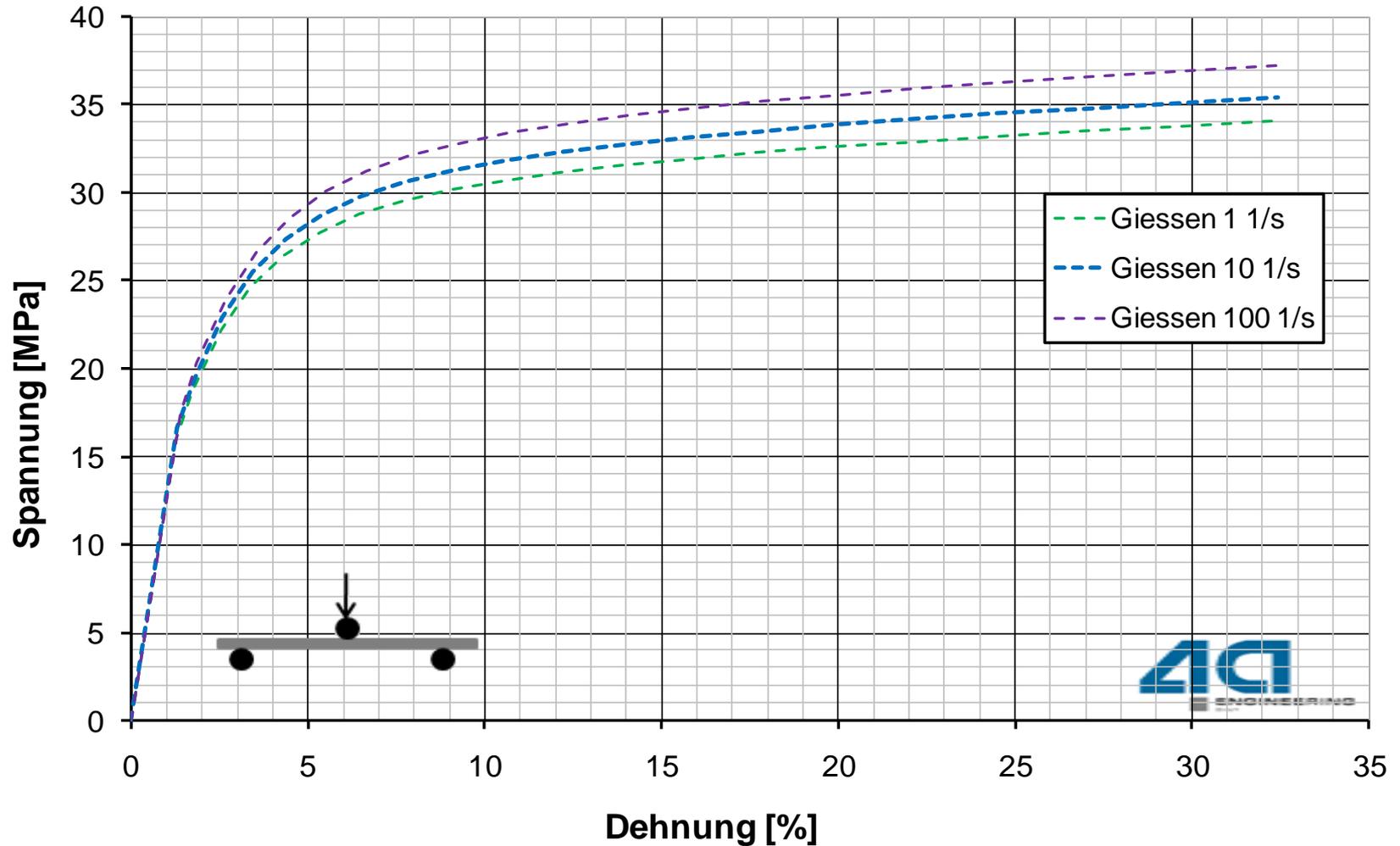


Stufe 79
Zeit 3.95 ms

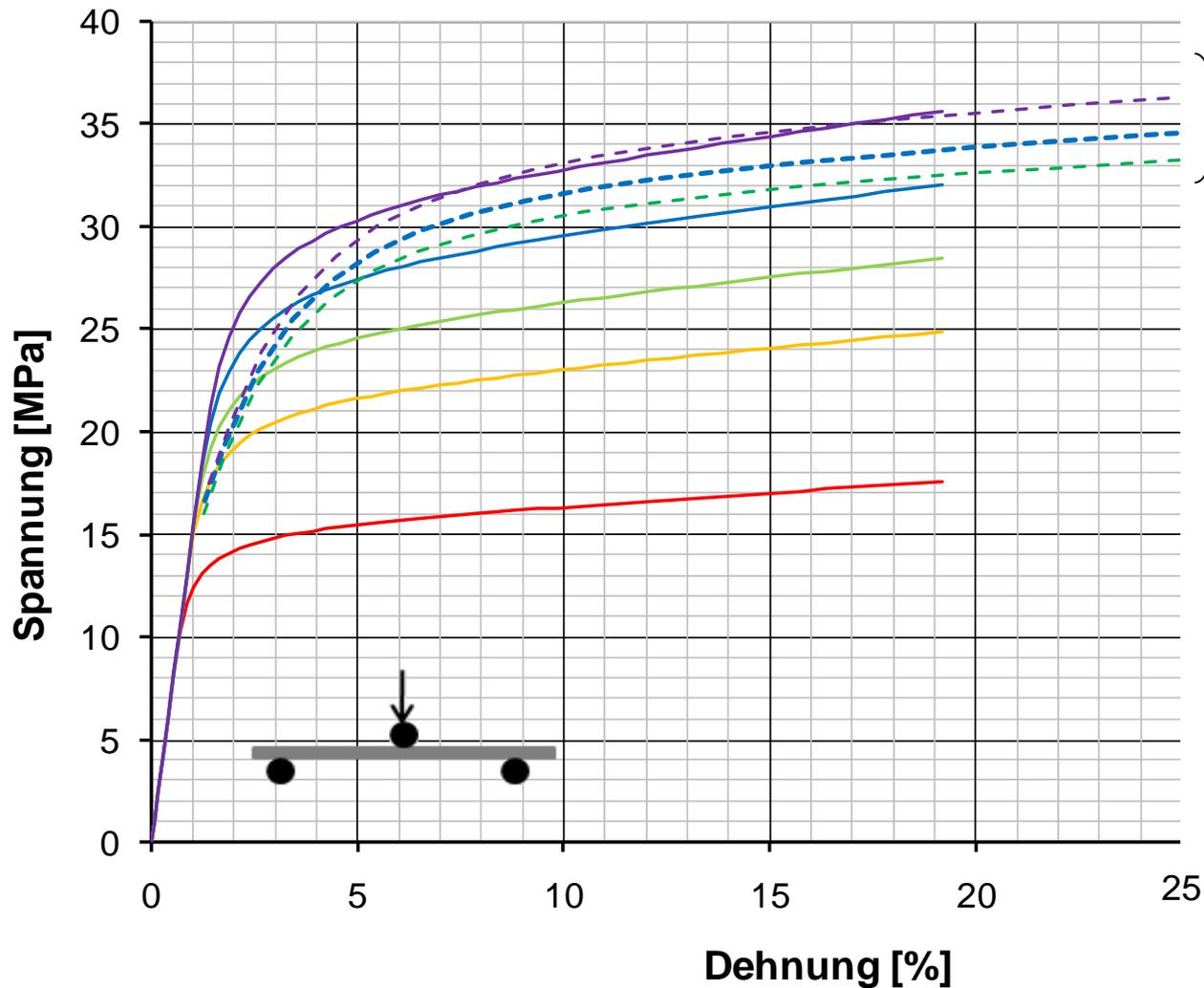
Epsilon X



Optimierte σ - ϵ -Kurven (Hostacom)

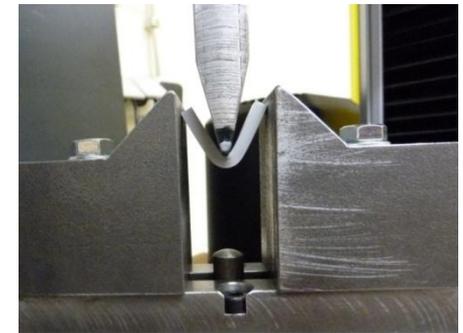


Verbesserung der Ergebnisse durch q.s.-Tests

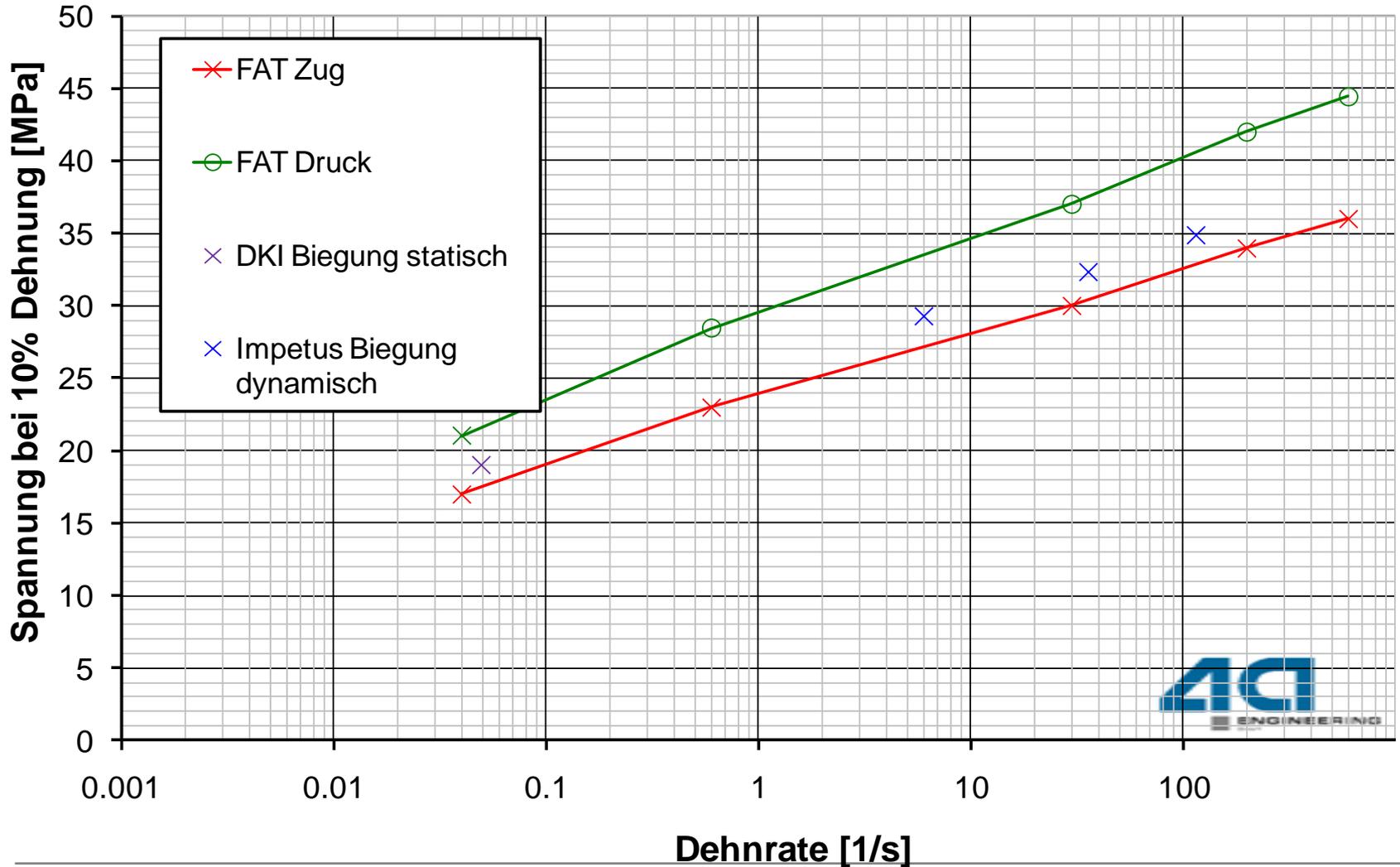


ohne q.s. Versuche

mit q.s. Versuche



Vergleich mit Zug-Druck-Versuchen



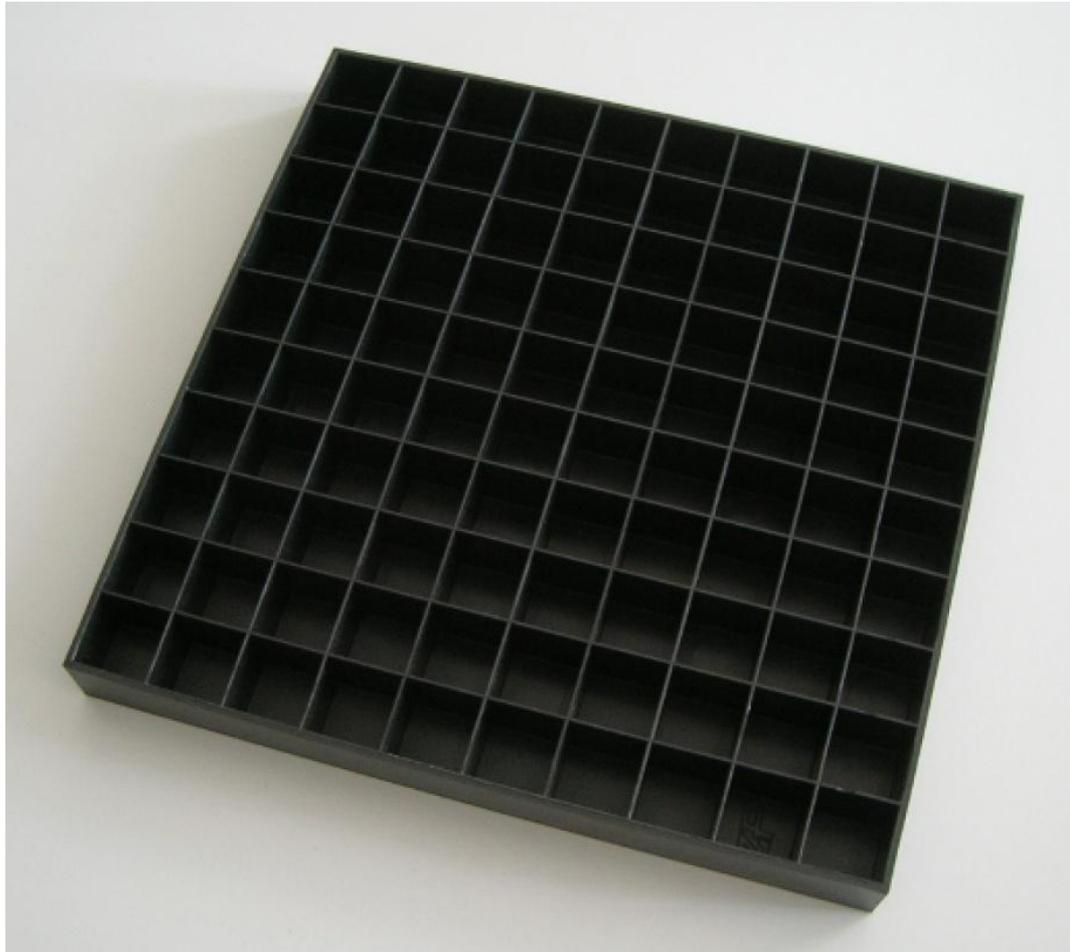
Validierung am Bauteilversuch



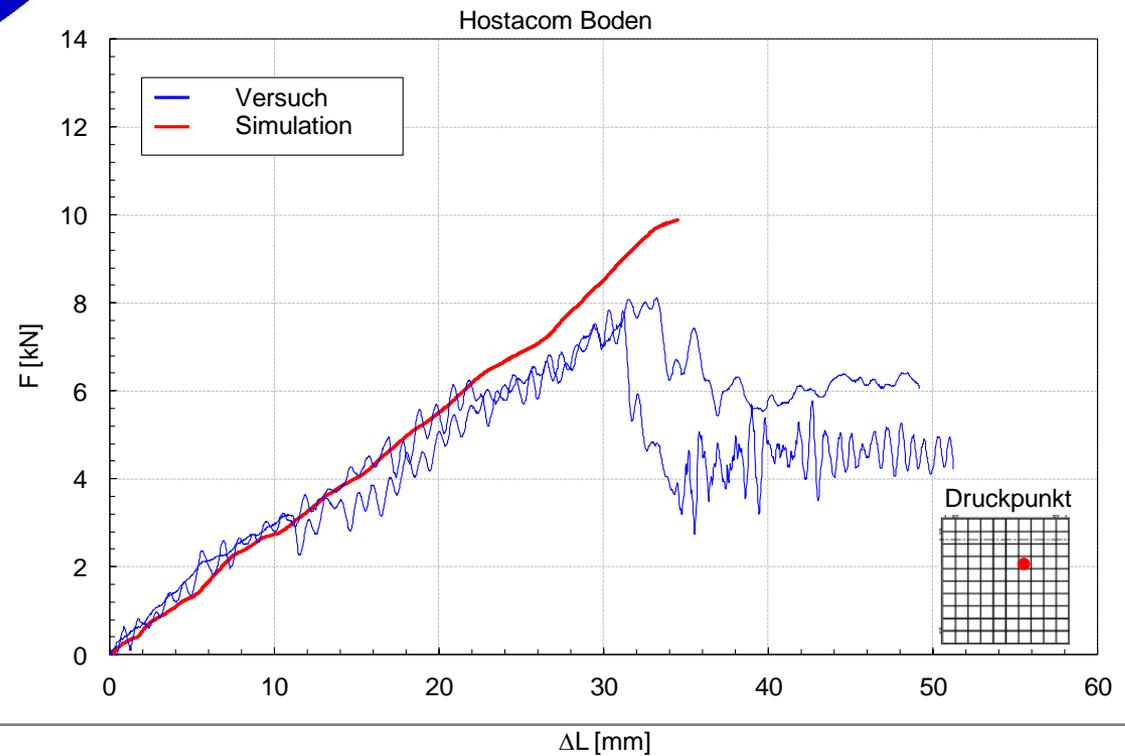
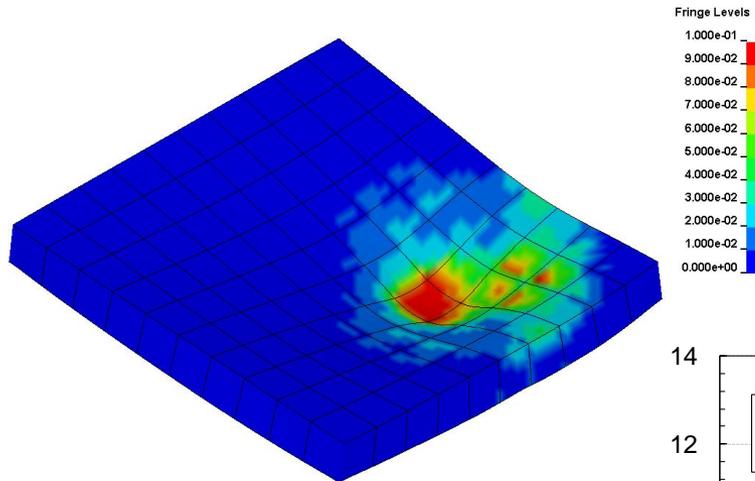
IMM
Institut für Mechanik
und Materialforschung



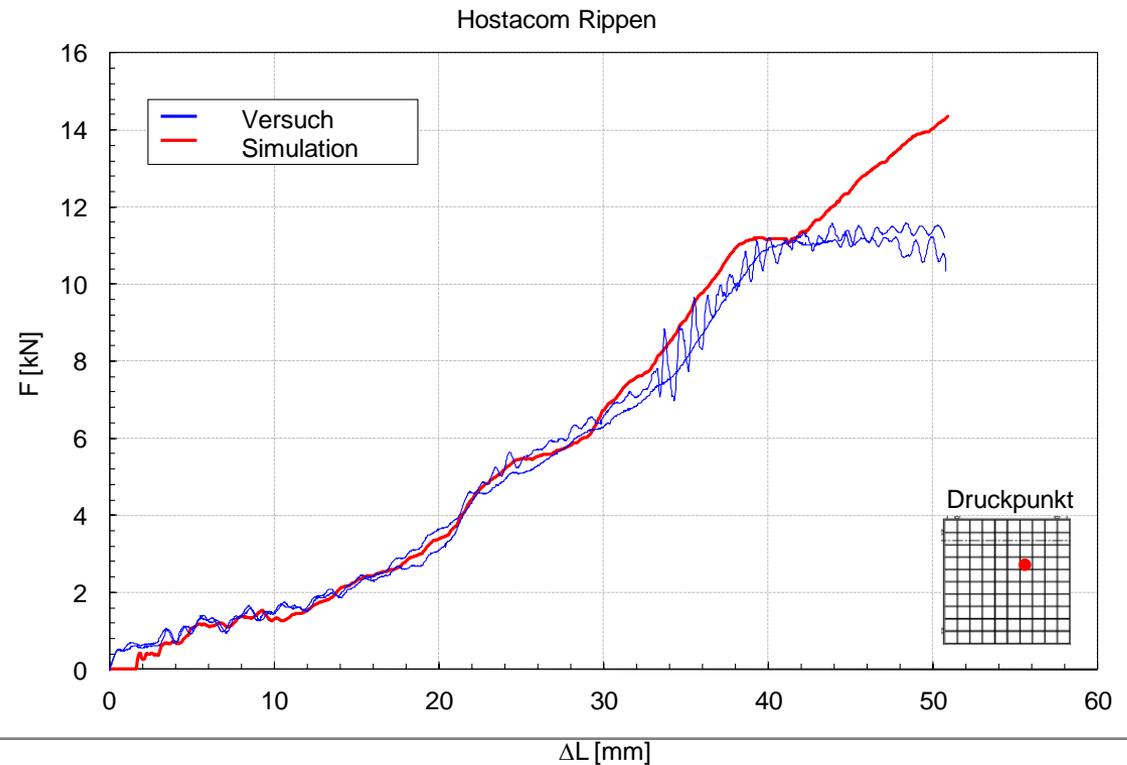
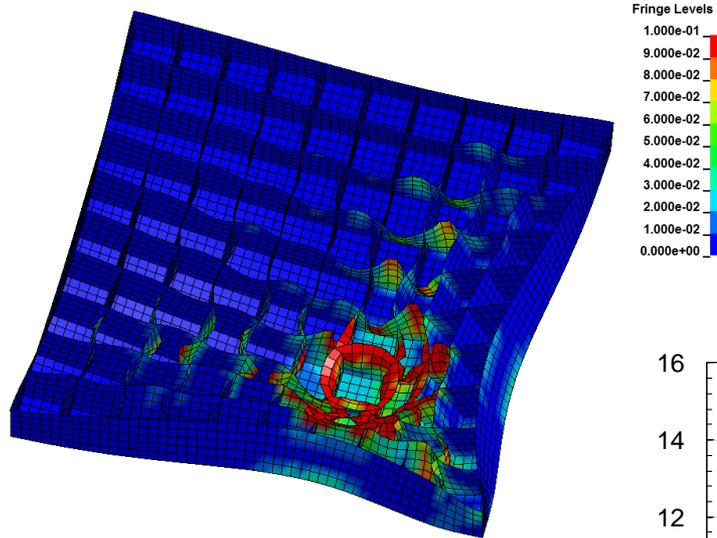
Forschungsvereinigung
Automobiltechnik



Validierung am Bauteilversuch

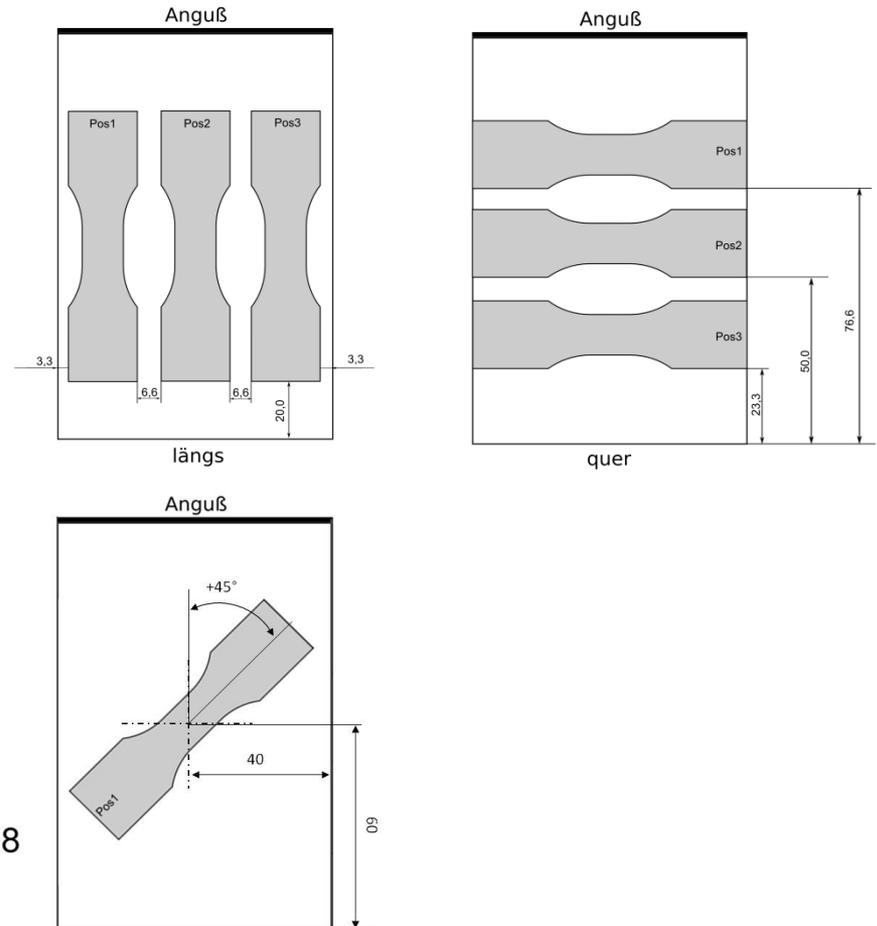
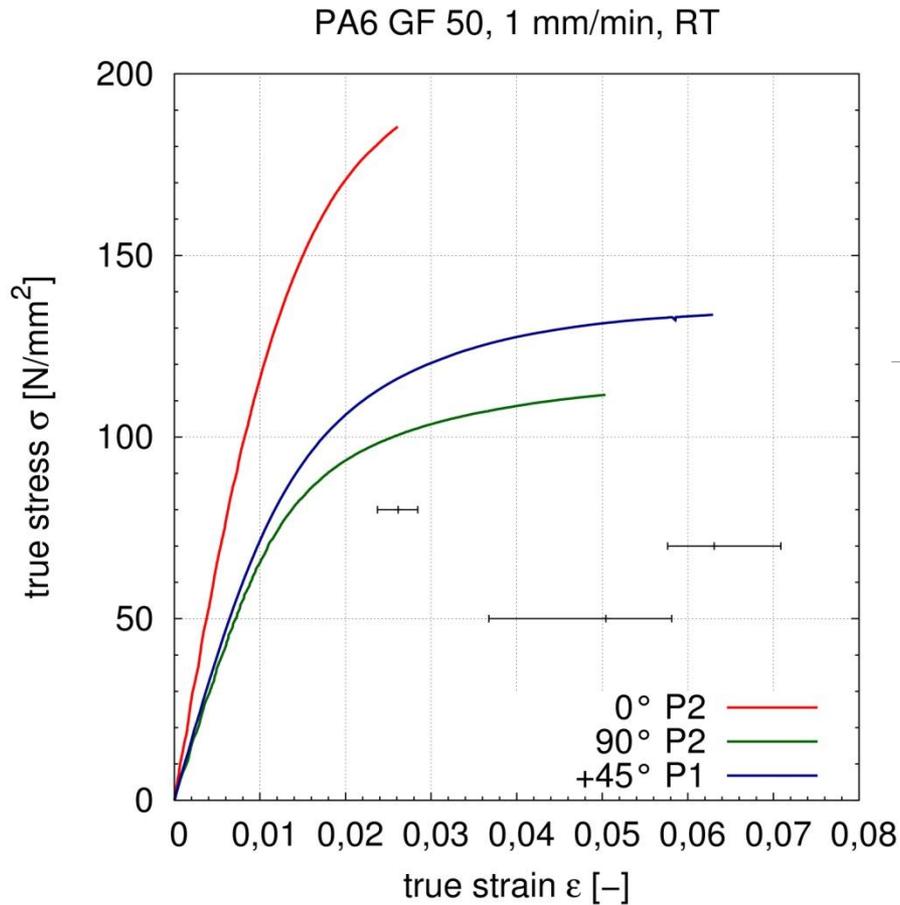


Validierung am Bauteilversuch

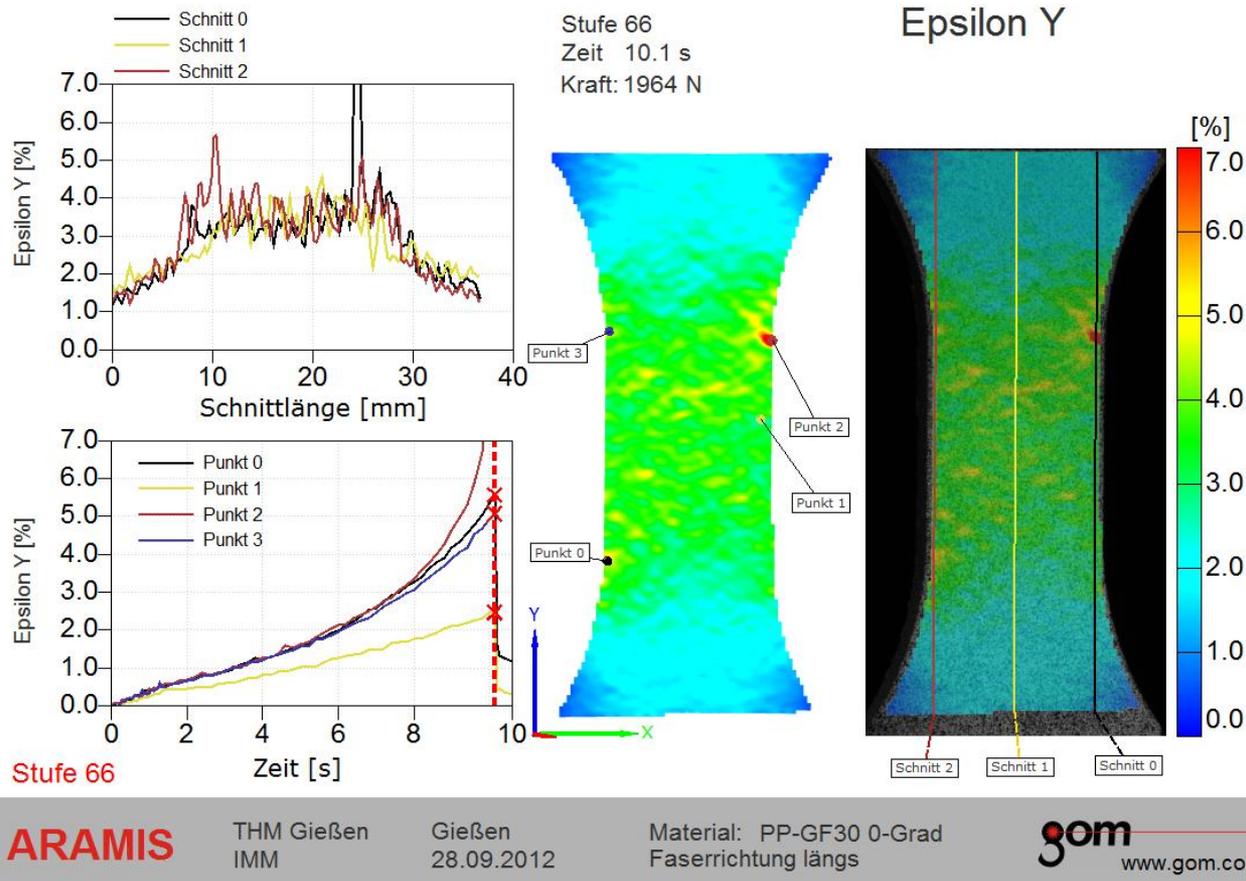


- Was zu tun ist: Validierung / Verifizierung
- Methoden zur dynamischen Charakterisierung
 - Fallturm oder Schnellzerreißer?
 - Optische Verzerrungsmessung (2D oder 3D?)
 - Tests unter mehrachsiger Beanspruchung
 - 4a Impetus – die schnelle Methode zur Materialkarte
- Was tun bei Anisotropie?
- Zusammenfassung

Einfluss der Faserorientierung



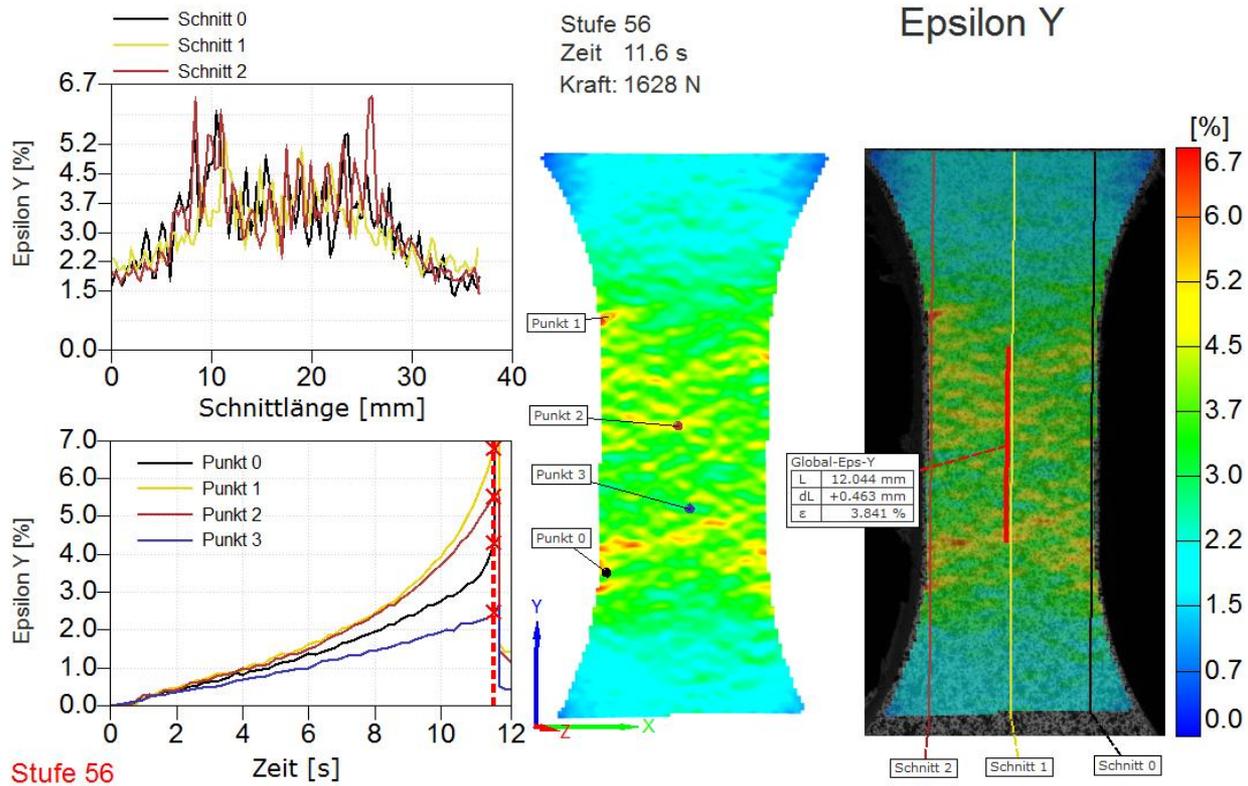
➤ Längsdehnung, Probe 0° zur Spritzgussrichtung



Dehnungsverteilung während des Zugversuchs



➤ Längsdehnung, Probe 90° zur Spritzgussrichtung



ARAMIS

THM Gießen
IMM

Gießen
28.09.2012

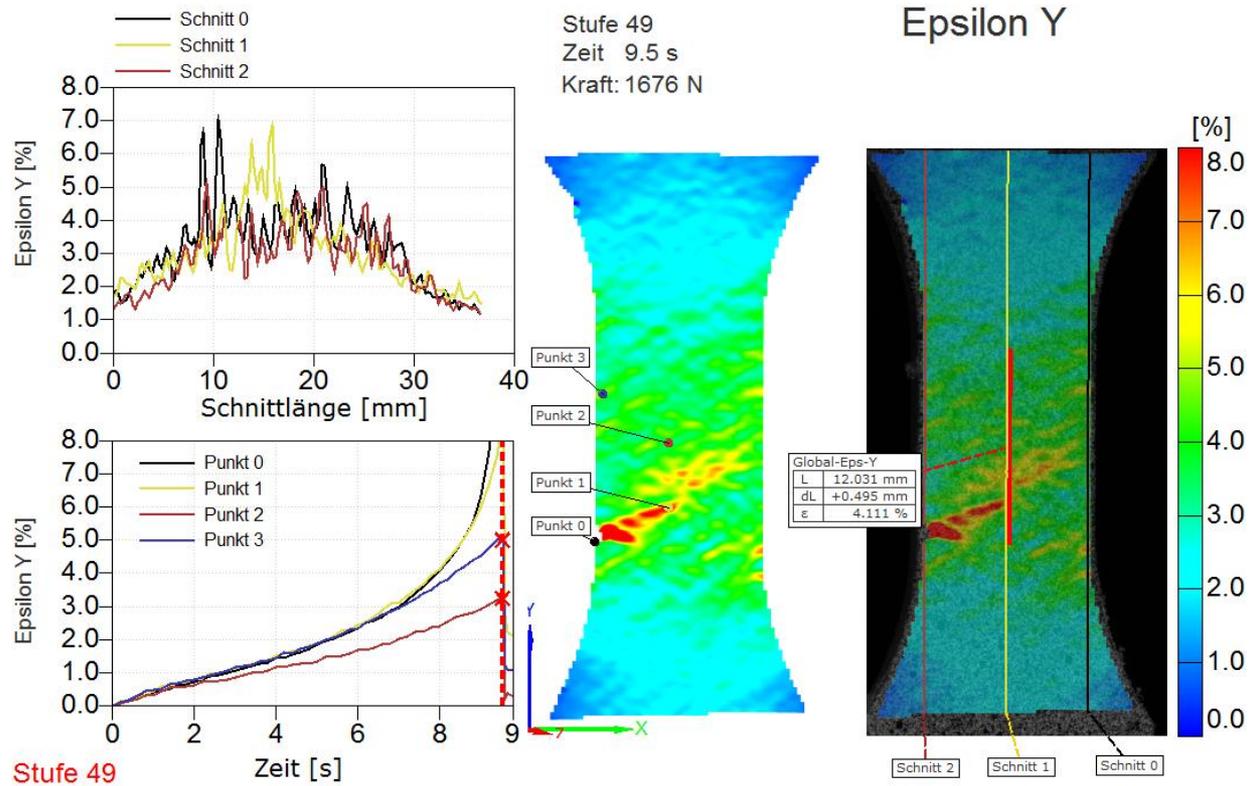
Material: PP-GF30-90
Kurzfaser Richtung 90° = quer

gom
www.gom.com

Dehnungsverteilung während des Zugversuchs



➤ Längsdehnung, Probe 45° zur Spritzgussrichtung



ARAMIS

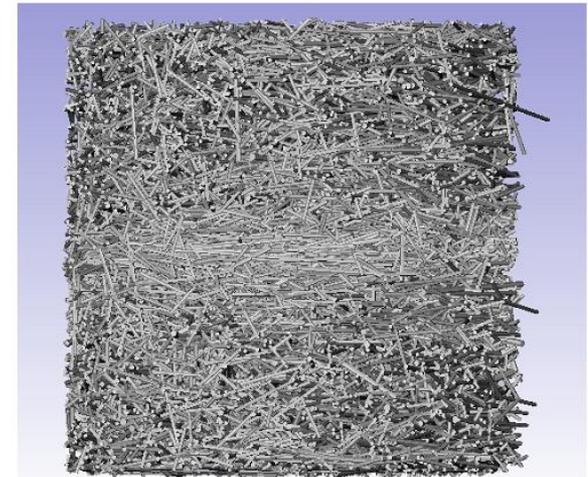
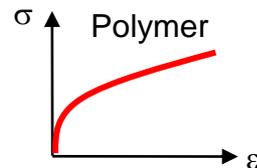
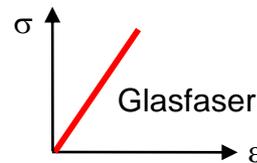
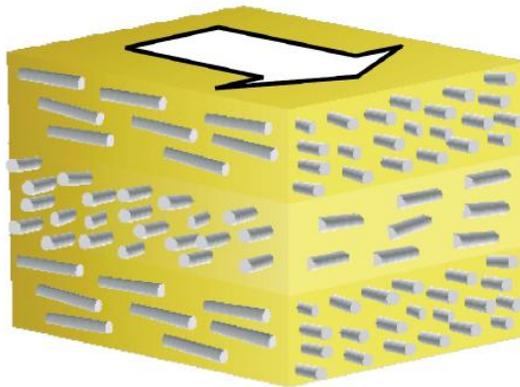
THM Gießen
IMM

Gießen
28.09.2012

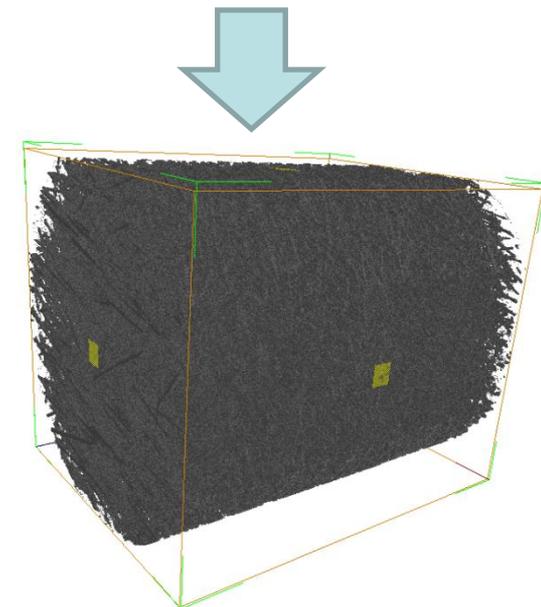
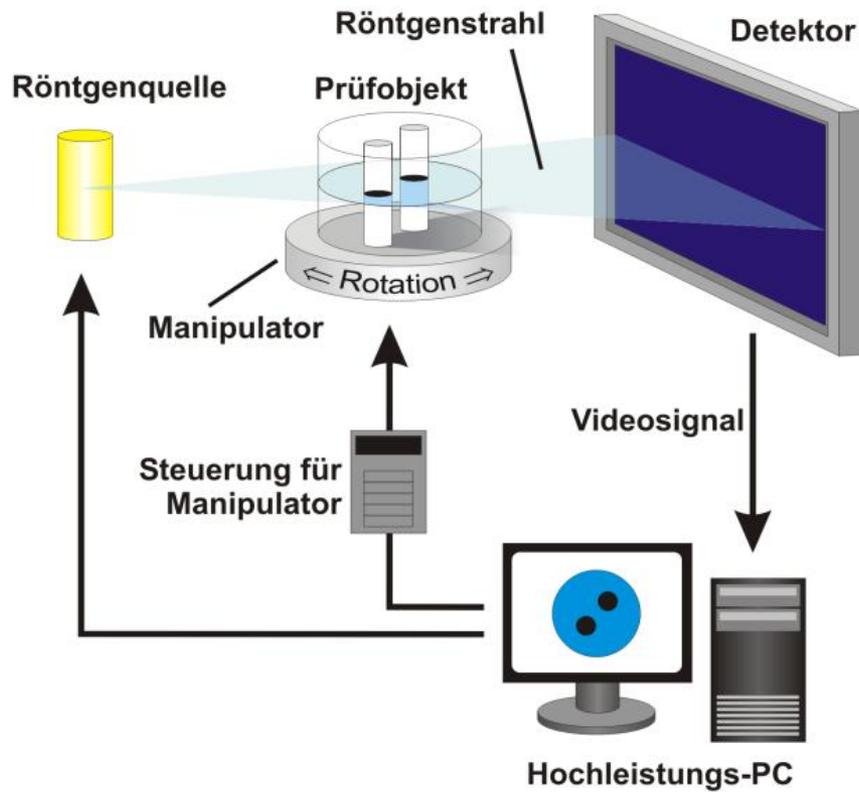
Material: PP-GF30 45°
Kurzfaser Richtung 45°

gom
www.gom.com

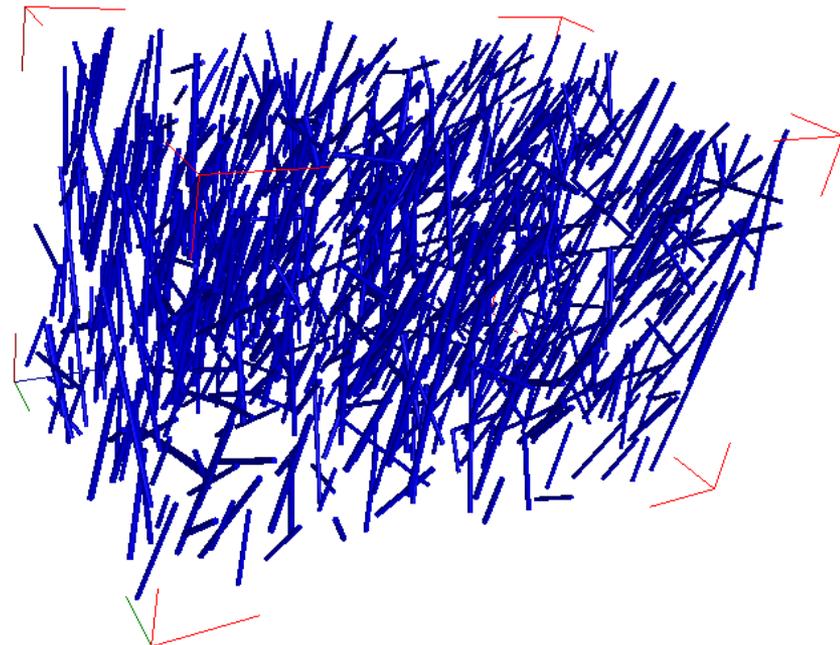
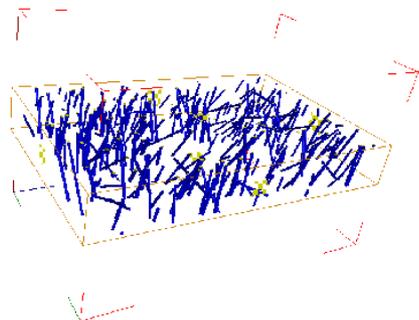
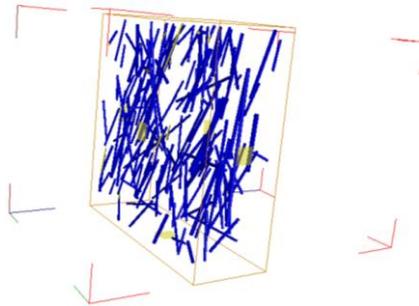
- Faserverstärkte Kunststoff zeigen aufgrund der Mikrostruktur ein stark inhomogenes Deformationsfeld
- Diese Effekte sind nur mit mikromechanischen Modellen abbildbar!
- Hierzu ist die Faserorientierung in jedem Punkt des Bauteils zu kennen (Spritzgusssimulation)!



➤ Funktionsweise



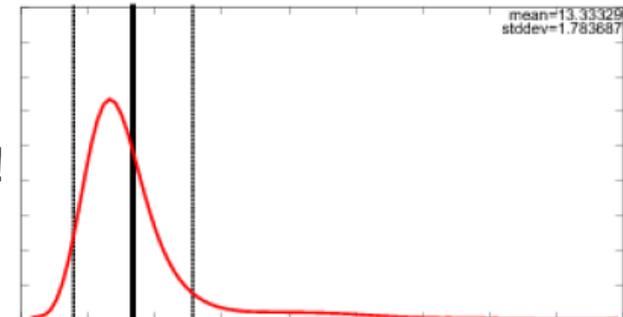
➤ Monte-Carlo-Faserekennungsalgorithmus



- Mathematische Repräsentation jeder Einzelfaser
 - Startposition, Richtungsvektor n_k , Länge, Radius
- Berechnung des Orientierungsverteilungstensors

$$a_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n (a_k)_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n (n_k)_i \cdot (n_k)_j = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

- Basis für die Validierung von Spritzgussimulationen
- Startwert für eine phänomenologische Berechnung ohne Spritzgussimulationen
- Berechnung der Faserlängenverteilung
 - Nicht in Spritzgussimulationen abbildbar!



µCT Ergebnisse – Bericht

_PP-GF30-Pos1-1833408_GF-Dict
1. Bestimmung der Komponenten des Orientierungssystems in 20 Schichten über die Höhe.

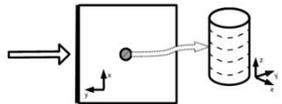


Abbildung 1: Probepreparation: Form, Ausrichtung, Koordinatensystem (Ebenennormale z = 0) und Probenebene in Höhe einer gegebenen Phase.

Aus der Plattenebene des Polylithers wurde zuerst eine zylindrische Probe mit einem Durchmesser von 2 mm entnommen und die Ausrichtung markiert (V-Achse). Das Polylitherscheibensystem wird wie folgt festgelegt: Die V-Achse zeigt parallel zum Schnittsystem, die Z-Achse verläuft parallel zur Plattenebene. An der Polylitherscheibe ist Z=0 (siehe Abbildung 1).

Die Probe wurde mittels Mikroskopie mit einer Auflösung von 1,80 µm Vorhintergrund entfernt und die resultierende Voxelmatrix mittels der LS-DYNA Software quantitativ analysiert. Insgesamt wurden 1143 Schnittbilder (2053 µm) rekonstruiert, wobei die mittlere 479 µm Höhe nicht in die Auswertung aufgenommen wurde, d.h. die zugewiesene Gesamthöhe der Probe beträgt ca. 1832 µm.

Die Software bezog 10784 Fasern in die Berechnung des Orientierungssystems ein. Für die lokale Auswertung in 20 Schichten erfolgte die Zuordnung der jeweiligen Faserorientierung über das Faserelement. Insgesamt wurde eine mittlere Faserlänge von 259 µm und eine mittlere Faserdicke von 12,39 µm ermittelt, wobei bei einer Matrixdicke von ~0,56 µm² und einer Gitterweite von 2,55 µm² ca. 28 % der Faserelemente berücksichtigt wurde. Nicht berücksichtigt wurden Fasern deren Elementlänge zu klein war (weniger als 10 µm) oder deren Aspektverhältnis unzureichend war (weniger als 10) oder deren Gitterweite (1,0 < G < 3) lag.

PP-GF30-Pos1-1833408

1/8

1.1. Bestimmung der lokalen Orientierungssystems-Hauptkomponenten

Die Software weist jeder rekonstruierten Faser (Index k) eine Lage (Δα_k), einen Radius (r_k) und eine Richtung (n_k) zu. Mit diesen Angaben werden für jede Schicht die Komponenten des volumengewichteten Orientierungssystems wie folgt bestimmt:

$$a_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \Delta \alpha_k \cdot r_k^2} \sum_{k=1}^N \Delta \alpha_k \cdot r_k^2 \cdot (n_{kj}) \quad (1)$$

Abbildung 2 zeigt den Verlauf der Hauptkomponenten (a₁₁, a₂₂, a₃₃) des mit Gleichung (1) für jede Schicht ermittelten Orientierungssystems. In Plattengericht ist zentral überlicherweise eine ausgeprägte Mittelachse erkennbar, in der die Fasern quer zur Faserlänge orientiert sind. Die auf den signifikanten Stellen gerundeten Werte für jede Orientierungskomponente inklusive der zugehörigen legenden Faseranzahl sind in Tabelle 1 aufgeführt.

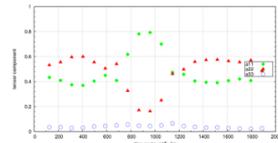


Abbildung 2: Schichtweise Entwicklung der Hauptkomponenten in Faserlänge (a₁₁, a₂₂, a₃₃) über die Faserlänge in der Plattenebene (a₁₁ und a₂₂ sind zur Plattenebene senkrecht).

Die folgende Abbildung 3 zeigt die Verteilung der mittleren Intensität über die Probendicke, wobei die erhaltene Fasermasse (Faser x Schicht, Intensität 0) die mittlere Intensität reduziert und ein vermindertes Faservolumen der mittleren Intensität enthält.

PP-GF30-Pos1-1833408

2/8

1.1. Bestimmung der lokalen Orientierungssystems-Hauptkomponenten

Die Software weist jeder rekonstruierten Faser (Index k) eine Lage (Δα_k), einen Radius (r_k) und eine Richtung (n_k) zu. Mit diesen Angaben werden für jede Schicht die Komponenten des volumengewichteten Orientierungssystems wie folgt bestimmt:

$$a_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \Delta \alpha_k \cdot r_k^2} \sum_{k=1}^N \Delta \alpha_k \cdot r_k^2 \cdot (n_{kj}) \quad (1)$$

Abbildung 2 zeigt den Verlauf der Hauptkomponenten (a₁₁, a₂₂, a₃₃) des mit Gleichung (1) für jede Schicht ermittelten Orientierungssystems. In Plattengericht ist zentral überlicherweise eine ausgeprägte Mittelachse erkennbar, in der die Fasern quer zur Faserlänge orientiert sind. Die auf den signifikanten Stellen gerundeten Werte für jede Orientierungskomponente inklusive der zugehörigen legenden Faseranzahl sind in Tabelle 1 aufgeführt.

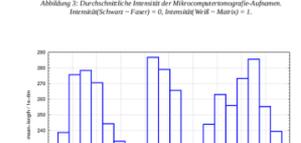


Abbildung 3: Durchdringung der Intensität der Mittelkomponenten (a₁₁, a₂₂, a₃₃) über die Probendicke (Schicht x Faser) = 0, Intensität = 0, Intensität = 1.

Die folgende Abbildung 4 zeigt die erhaltene mittlere Faserdicke in jedem Slice. Da die reale Durchdringung unterschiedlich konstant ist, können hier nur Richtwerte aufgeführt und die Abweichungsgrenzen angegeben werden. Die Gesamtlänge der erhaltene Fasern ist in Abbildung 6 dargestellt.

PP-GF30-Pos1-1833408

3/8

1.1. Bestimmung der lokalen Orientierungssystems-Hauptkomponenten

Die Software weist jeder rekonstruierten Faser (Index k) eine Lage (Δα_k), einen Radius (r_k) und eine Richtung (n_k) zu. Mit diesen Angaben werden für jede Schicht die Komponenten des volumengewichteten Orientierungssystems wie folgt bestimmt:

$$a_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \Delta \alpha_k \cdot r_k^2} \sum_{k=1}^N \Delta \alpha_k \cdot r_k^2 \cdot (n_{kj}) \quad (1)$$

Abbildung 2 zeigt den Verlauf der Hauptkomponenten (a₁₁, a₂₂, a₃₃) des mit Gleichung (1) für jede Schicht ermittelten Orientierungssystems. In Plattengericht ist zentral überlicherweise eine ausgeprägte Mittelachse erkennbar, in der die Fasern quer zur Faserlänge orientiert sind. Die auf den signifikanten Stellen gerundeten Werte für jede Orientierungskomponente inklusive der zugehörigen legenden Faseranzahl sind in Tabelle 1 aufgeführt.

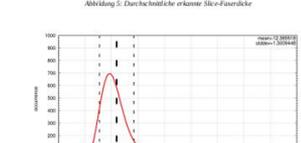


Abbildung 4: Durchdringung der Intensität der Mittelkomponenten (a₁₁, a₂₂, a₃₃) über die Probendicke (Schicht x Faser) = 0, Intensität = 0, Intensität = 1.

Die folgende Abbildung 5 zeigt die erhaltene mittlere Faserdicke in jedem Slice. Da die reale Durchdringung unterschiedlich konstant ist, können hier nur Richtwerte aufgeführt und die Abweichungsgrenzen angegeben werden. Die Gesamtlänge der erhaltene Fasern ist in Abbildung 6 dargestellt.

PP-GF30-Pos1-1833408

4/8

Schicht mitten µm	Faser- anzahl	Orientierungskomponenten								
		a ₁₁	a ₂₂	a ₃₃	a ₁₂	a ₁₃	a ₂₃	a ₁₂	a ₁₃	
103,64	387	3,7E-1	3,7E-1	3,1E-3	3,7E-1	6,0E-1	4,3E-4	1,1E-3	4,5E-4	2,2E-2
483,56	402	2,7E-1	3,5E-1	3,0E-3	3,2E-1	6,0E-1	3,0E-4	9,4E-4	3,1E-2	1,1E-2
496,29	416	4,0E-1	2,8E-1	3,0E-3	2,8E-1	5,6E-1	2,1E-3	8,0E-3	2,1E-3	4,1E-2
589,01	381	4,3E-1	1,8E-1	3,0E-4	1,8E-1	5,0E-1	2,7E-3	3,0E-3	2,7E-3	4,5E-2
581,75	446	4,7E-1	4,0E-2	1,7E-2	4,0E-2	5,4E-1	3,5E-2	1,7E-2	3,5E-2	5,0E-2
774,48	424	6,2E-1	1,4E-1	2,0E-2	1,4E-1	3,8E-1	1,0E-2	2,0E-2	1,0E-2	1,6E-2
867,18	421	7,8E-1	2,4E-1	4,3E-2	2,4E-1	1,7E-1	2,3E-3	4,3E-2	2,3E-3	4,7E-2
959,91	407	7,8E-1	2,9E-1	3,1E-2	2,9E-1	1,6E-1	1,7E-2	3,1E-2	1,7E-2	4,4E-2
1052,63	389	7,0E-1	3,0E-1	1,2E-2	3,0E-1	2,5E-1	3,1E-2	1,2E-2	3,1E-2	4,0E-2
1145,36	413	4,7E-1	2,1E-1	1,1E-2	2,1E-1	4,4E-1	1,4E-2	1,1E-2	1,4E-2	3,5E-2
1238,08	362	4,6E-1	1,3E-2	3,0E-3	1,3E-2	5,0E-1	4,4E-2	3,0E-3	4,4E-2	4,4E-2
1330,81	349	4,0E-1	1,4E-1	2,7E-3	1,4E-1	5,4E-1	1,7E-2	2,7E-3	1,7E-2	3,0E-2
1423,53	375	2,0E-1	2,8E-1	3,0E-3	2,8E-1	3,7E-1	3,0E-3	3,0E-3	3,0E-3	3,0E-2
1516,26	376	3,0E-1	3,0E-1	3,0E-3	3,0E-1	3,0E-1	3,1E-3	2,0E-3	3,1E-3	3,1E-2
1609,00	413	4,1E-1	3,0E-1	2,9E-3	3,0E-1	5,6E-1	4,0E-3	2,9E-3	4,0E-3	2,8E-2
1701,73	374	4,2E-1	3,0E-1	2,7E-3	3,0E-1	5,4E-1	3,1E-3	2,7E-3	3,1E-3	2,4E-2
1794,46	376	4,1E-1	2,8E-1	2,1E-3	2,8E-1	5,7E-1	3,0E-3	2,1E-3	3,0E-3	3,2E-2
1887,19	300	4,0E-1	3,5E-3	1,2E-2	3,5E-3	4,2E-1	1,2E-3	1,2E-2	1,2E-3	2,4E-2

Tabelle 1: Vollständige Angabe der Orientierungskomponenten, einschließlich der zugehörigen Fasernanzahl.

2. Bestimmung der Faserlängeverteilung

Die Faserlängeverteilung der gesamten Probe ist in Abbildung 2 grafisch, sowie in Tabelle 2 inklusive Intervall-/Werten dargestellt.

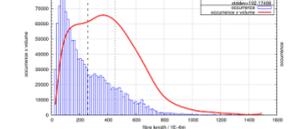


Abbildung 5: Volumen (rot) und Anzahl (blau) gewichtete Faserlängeverteilung und der Faseranzahl.

Mitte des Längenintervalls in µm	Anzahl der Fasern	Mitte des Längenintervalls in µm	Anzahl der Fasern
29	239	263	211
44	463	278	199
58	571	292	208
73	638	307	217
87	614	321	206
102	542	336	198
117	502	351	207
131	453	365	198
146	399	380	183
161	363	394	167
175	343	409	165
190	294	424	134
204	296	438	146
219	267	453	137
234	266	468	137
248	251	482	144

_PP-GF30-Pos1-1833408

6/8

Mitte des Längenintervalls in µm	Anzahl der Fasern	Mitte des Längenintervalls in µm	Anzahl der Fasern
497	128	914	2
511	97	929	2
526	114	943	3
541	108	958	3
555	80	973	0
570	77	987	2
585	63	1002	2
599	72	1016	2
614	29	1111	2
628	65	1126	2
643	81	1140	2
658	59	1155	4
672	49	1169	2
687	47	1184	0
702	29	1199	1
716	33	1213	0
731	25	1228	0
745	21	1243	1
760	10	1257	1
775	14	1272	1
789	13	1286	0
804	9	1301	0
819	12	1316	0
833	128	1330	2
848	13	1345	0
862	9	1360	0
877	7	1374	0
892	6	1389	0
906	5	1403	0
921	7	1418	0
936	6	1433	0
950	9	1447	1
965	5	1462	0
979	3	1477	0

PP-GF30-Pos1-1833408

7/8

2. Bestimmung der Faserlängeverteilung

Die Faserlängeverteilung innerhalb automatisch bestimmter Intervallgruppen.

Mitte des Längenintervalls in µm	Anzahl der Fasern
1091	1

PP-GF30-Pos1-1833408

8/8



- Hochgeschwindigkeitsversuche (servohydraulisch / Fallturm):
 - Lokale Messung (GOM ARAMIS 2D/3D)
 - Uniaxialer Zug sowie Schub bis best. Dehnungsbereich
 - Druck zur Zeit im Test (Split-Hopkinson Bar)
- 4a Impetus
 - Schnelle und qualitativ gute Materialkartengenerierung (Biegung)
 - Als Validierungstests für Hochgeschwindigkeitsversuche
- Mehrachsigkeit
 - Lokale Messung (GOM ARAMIS 2D/3D)
 - Schub / Druck mittlerweile Standard
 - Biaxiale Testvorrichtung in Planung



➤ Anisotropie

- Tests unter verschiedenen Entnahmewinkel
- 3D Dehnungsauswertung
- Validierung der Faserorientierung über μ CT und spezielle Software am Fraunhofer LBF verfügbar

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!